

河流生态学研究中的几个热点问题*

蔡庆华** 唐涛 刘建康

(中国科学院水生生物研究所, 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072)

【摘要】 近年来河流生态系统成为湖沼学研究的重点, 很多新理论、新方法被应用到研究中. 文章综述了国内外的相关研究, 并着重从河流连续、河流的生态需水量、河流生态系统的服务价值与健康评价、河流的生态系统管理以及流域生态学等几个热点方向作了详细论述. 作者认为, 今后河流生态学的研究应在流域尺度上展开, 结合河流健康及生态系统服务评价进行河流生态系统可持续管理研究将是近期河流生态学的重点问题之一. 鉴于我国的实际情况, 作者建议应该尽快开展相关领域的研究.

关键词 河流连续统 生态系统服务 生态系统健康 生态系统管理 流域生态学

文章编号 1001-9332(2003)09-1573-05 **中图分类号** Q178.512 **文献标识码** A

Several research hotspots in river ecology. CAI Qinghua, TANG Tao, LIU Jiankang (State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2003, 14(9): 1573~1577.

River ecology is a vital field in limnological research, and several new theories and methods have been developed and used in the study of lotic systems. In this article, a summary of these new theories was introduced, which includes river continuum concept, ecological water consumption of river ecosystem, services and health of river ecosystem, ecosystem management, and watershed ecology. The authors suggested that the research of river ecology should be carried out on the scale of watershed, and that the combination of ecosystem health and ecosystem services could be the key point in the sustainable development management of river ecosystem. Seeing that there are few studies in this area in China, relevant research should be conducted as soon as possible.

Key words River continuum concept, Ecosystem services, Ecosystem health, Ecosystem management, Watershed ecology.

1 引言

河流生态学历史性地根源于水生昆虫学和渔业生物学, 是湖沼学(Limnology)的重要研究内容之一. 但在很长一段时期内, 河流系统的湖沼学(或称为河流生态学)研究总体上滞后于湖泊生态学的同期发展, 这种局面一直持续到20世纪70年代中后期^[52]. 此后, 由于全球水资源危机和洪涝灾害的频繁发生促使人们给予河流更多的关注, 河流生态学领域从此日趋活跃, 并发展成为湖沼学领域中一门高度交叉型(如与水文学、生物学、地貌学等的结合)学科^[11], 其理论体系也取得了重要突破. 主要表现在: 1) 研究视野从个体发展到系统层次; 2) 认识到河流及其陆地环境间的密切关系; 3) 形成了河流营养物质在开放系统循环的思想; 4) 关注河流生物群落内生物作用的重要性^[28].

本文对河流连续统、河流的生态需水量、河流生态系统的服务价值与健康评价、河流生态系统管理以及流域生态学等当前河流生态学研究中的几个热点问题作了简要论述, 希望能为该领域将来的研究工作提供一些理论帮助.

2 河流连续统与河流的生态学研究

河流连续统概念(river continuum concept, RCC)^[46]是对河流生态学理论的一大发展. 该理论认为, 由源头集水区的

第一级溪流起, 向下流经各级河流流域, 形成了一连续的、流动的、独特而完整的系统. 这种由上游的诸多小溪至下游大河的连续, 不仅指地理空间上的连续, 更重要的是生物学过程及其物理环境的连续. 按照RCC理论, 不规则的线性河流单向连接, 下游河流中的生态系统过程同上游河流直接相关. 这一理论还概括了沿河流纵向有机物数量和时空变化、水体摄食功能类群的结构和资源的分配, 使得河流生态系统特征的预测成为可能.

河流连续统概念划分了3个沿纵向分布的基本系统模式: 1) 低级别河流: 由于森林郁闭度高和基质的不稳定, 自身的初级生产量小; 主要的能量来源于异源性的有机物输入, 生产-呼吸率比值(P/R)小于1; 2) 中等级别的河流: 由于森林郁闭度低且水浅, 具有较高的自源初级生产能力; 主要的能量来自大型水生植物和周从生物, P/R>1; 3) 高级别河流: 由于水深且混浊, 自源初级生产量较低, 主要的能量源是源自上游河段的细有机颗粒物(FPOM), P/R<1. 实际上, 这种纵向的格局很罕见, 如果有, 也只是存在于未受干扰的河流中. 一般情况下, 代表RCC系统的3种模式呈斑块分布于

* 国家自然科学基金项目(30070153)、中国科学院重要方向项目(KSCX2-SW-111)、中国科学院重大项目(KZCX1-SW-12-IV-21)、中国科学院水生生物研究所领域前沿资助项目(K220208).

** 通讯联系人.

2002-09-02 收稿, 2002-10-23 接受.

整个河流系统中,某一河段的具体特征由占数量优势的那种模式体现^[4]。Welcomme^[51]认为,从事低等级河流的研究人员应通过继续探讨水-陆界面和输入系统的外来物质的来源和流向,重点研究横向关系,其保护战略应以保持完整的或恢复输入物所基于的植被为目标;中等河流的保护策略应针对纵向过程的维持或保护。在较大的河流系统,其重点应围绕系统中重新包含洪泛平原特性后的横向过程管理^[3]。

各国河流生态学家在验证河流连续统概念的同时,还不断补充和完善该理论^[3,28,48]。例如,Ward^[49]将河流生态系统描述成四维的系统,包括纵向、横向、垂向和时间分量。在纵向上,河流是一个线性系统,从河源到河口均发生物理的、化学的和生物的变化。河流与其所在流域的横向联系同样很重要,靠河流近的区域,即使是很窄的一条沿河区都有很多功能^[3]。河岸的植物提供了生态环境,并且起着调节水温、光线、渗漏、侵蚀和营养输送的作用。与河流发生相互作用的垂直范围不仅包括地下水对河川径流水文要素和化学成分的影响,而且还包括生活在下层土壤中的有机体^[3]。河流系统的时间尺度在许多方面也是很重要的。河道形态可能需在很长时期内自然地改变,即使是由自然突发事件或人类介入导致的改变,也需要几十年才显现出来^[35]。

纵观最近20多年河流生态学的发展,几乎所有研究都是在河流连续统概念的基础上开展的。这些研究涉及到河流生态学的各方面,而河流的生物多样性及其与主要生态因子(如水文学和水化学因子等)间的相互关系及其时空变化规律等是其主流。研究表明,生物多样性和生态因子间的关系是错综复杂的,其时空规律变化很大,对整个河流生态系统特征的作用也各不相同^[2,16]。与以往研究不同的是,这些因子格局的尺度相关性受到高度重视。大量的研究表明,影响河流生物的分布既有河流生境地貌学、水文学、水化学等理化因素,也有系统内生物成分间相互作用等生物因素;同时,诸多因素的影响往往表现出很强的尺度相关性。对藻类而言,样点微生境特征(如流速、氮、磷等营养盐水平、大型无脊椎动物的牧食压力等)主导河区、河段短期尺度上藻类的分布^[43],而气候、地质状况等景观特征则主要通过通过对亚流域、流域尺度上营养盐的作用而对藻类的长期分布产生影响。有学者甚至认为,美国东向森林河流都是磷限制的,而流向太平洋的西北向河流都是氮限制的^[30]。底栖无脊椎动物的物种丰富度和分布格局受河流级别、河流宽度、坡度、流速、及基质多样性、河岸植被带状况等河道生境特征和地质特征等因素的影响。其中,某一河段的坡度决定该区域内特定生境的沉积性营养物的分布状况,进而左右该点的无脊椎动物分布;在更宏观尺度上,不同河段坡度的变化会影响生境的多样性,从而导致河段间无脊椎动物丰富度的变化。水生态系统的重要成员之一,水细菌的格局特征也逐渐受到重视。有研究表明,河流水细菌受水中芳香族化合物含量、藻类、原生动物的影响呈现出明显的纵向格局^[22]。

与此同时,河流与岸上陆地系统间的密切关系也受到重视。河岸植被带的纵向分布格局对不同河段营养盐的浓度和

特定生物种群的密度分布等有重要影响,流域内陆地系统的土地利用状况也会对河流产生深远的影响(例如河流源头森林植被的破坏会增加下游洪水泛滥的可能性,流域内过度的农业活动会导致河流生态健康的恶化等)。很显然,河流生态学的研究视野已有所拓展^[32],就河论河的研究方法逐渐为河流与流域相结合的方法所替代,流域尺度的研究正在兴起。

3 水资源与河流的生态需水量

水是淡水生态系统的基本要素,了解水资源是认识该类生态系统服务的关键。尽管由于研究或应用的方向不同,对水资源的定义也稍有差别,但传统的水资源观点是指水量和水能两个主要内容。随着认识水平的提高及对环境、水资源等问题的重视,人们逐渐意识到水质及水生生物的重要性。我们曾提出水资源应明确包括水量、水质、水能和水生生物四大要素的观点^[9],这种观点与传统观点的不同在于强调水质和水生生物的重要性。在传统观点及其水资源开发利用中,往往重量不重质、重水本身而不重水生生物、重开发利用而不重规划保护、重经济效益而不重生态效益,这种认识和做法明显存在缺陷,也限制了对水资源的进一步开发利用。新的观点明确地把水质、水量、水能和水生生物作为水资源的四个主要内容,并强调水质在水资源组成要素中的重要性,这与大家日益重视的水质恶化及技术水平上对水资源利用按质处理密切相关。此外,该观点把水生生物纳入水资源组成要素之中,强调了水生生物在净化水体、开发水体生产力以及水生生物多样性保护中的作用^[7]。

在美国于1978年完成的第2次全国水资源评价(The Second National Water Assessment)中,既考虑了河道外用水,也估计了鱼和其他水生生物、游览、水力发电、航运等河道内用水,其中,把生态环境用水作为主要的河道内控制用水^[15]。在估计每一个水资源分区内水生生物用水量时,以分区河流出流点的月流量作为判断,提出评判标准:1)河道内径流为多年平均值的60%,这是为大多数水生生物主要生长期提供优良至极好的栖息条件所推荐的基本径流量;2)河道内径流为多年平均值的30%,这是保持大多数水生生物有好的栖息条件所推荐的基本流量;3)河道内径流为多年平均值的10%,这是大多数水生生物短时间生存条件所推荐的最低瞬时径流量^[31]。

对河流保护可概括为维持基本的生物学过程和生命支持系统、保护基因多样性、确保物种和生态系统的可持续性3个方面^[3]。而生态需水的保证为河流保护的实现提供了可能。生态需水量是指为维持地表水体特定的生态环境功能,天然水体必须储存和消耗的最小水量^[24]。在实际计算中,生态需水量可分为3个部分:1)河流基本生态环境需水量,即维持河流系统最基本的生态环境功能所需要的最少水量;2)河流输沙排盐需水量,即维持河流形态和盐分的动态平衡,在一定输沙、排盐要求下所需要的水量;3)湖泊洼地生态环境需水量,即维持湖泊洼地水体功能而消耗于蒸发的水量。

计算生态需水量应遵循 4 大平衡原则: 水热(能)平衡、水盐平衡、水沙平衡以及区域水量平衡与供需平衡^[25], 同时还应以生态环境现状作为评价的起点, 而不是以天然生态环境为尺度进行评价^[37]. 在 4 大平衡原则的基础上, 深入研究水资源承载力和科学地计算必要的生态需水量.

20 世纪 90 年代以前河流流量的研究主要集中在: 分别考虑河道物理形态、所关心的鱼类、无脊椎动物等对流量的需求, 来确定最小及最佳的流量. 其中对鱼类与河流流量关系的研究较多, 而鱼类、流量与水质标准三者相互关系的研究未见报道. 另外, 在确定河流流量的过程中未充分考虑生态系统的完整性^[15].

在河流管理中, 生态的需要与河流流量变化特征高度相关. 维持河道的流量, 应包括最小的和最适宜的流量. 丰水年和伴随而来的高径流量对于维持河道整体的形态及洪泛平原系统非常重要^[36]. 需考虑基流流量的自然频率和持续时间, 并尽可能地保持生态可接受的流量变化, 其确定过程包括: 1) 对生态目标和综合目标的定义, 它是建立在可利用的水文的、地形的、生态的和管理信息的, 并包括历史纪录的整体评价基础之上的. 生态目标应包含生境和物种数量可接受损失的概念. 2) 定义河流的径流量需要面对生态目标, 不仅要考虑当前可接受的平均流量, 而且要参照基流量, 或者是极低的或极高的流量并考虑它们的频率和持续的时间^[15].

近年来, 由于工业大量排污和农业面源污染, 使得河流自净能力严重下降, 生态用水中的水质得不到保证. 城市和工业用水挤占农业用水, 农业用水挤占生态用水, 结果导致了生态环境恶化, 甚至对经济的可持续性发展构成了威胁. 残酷的现实迫使人们意识到必须对由河流流量变化导致的生物群落变化(和恢复)进行预测, 并且应该把维持河流生态系统生物群落和有价值的社会商品和服务的完整性作为河流管理的重要目标^[40-42].

4 河流生态系统的服务价值与健康评价

生态系统服务是对人类生存及生活质量有贡献的生态系统产品和生态系统功能, 支撑着人类的生存和社会发展^[44]. 自 20 世纪 70 年代提出生态系统服务的概念以来, 这方面的研究就引起了生态学界的重视^[13, 14], 国内外不少学者已在不同尺度上就不同类型生态系统提供的各种服务进行了有益的探索^[1, 10, 17, 26, 33, 34]. 其中, 陆地生态系统, 特别是森林生态系统服务的研究日趋完善, 但对于淡水生态系统服务的研究则相对不足. 我们认为, 研究河流生态系统服务价值应以水资源为出发点, 从其 4 大特性可归纳出河流生态系统的主要服务价值^[6].

(1) 供水. 根据不同水体的水质状况, 所蓄之水被用于生活饮用、工业用水、农业灌溉等方面, 其价值由水量和水质共同决定.

(2) 水能. 水力发电是该功能的转换形式, 如今很多淡水生态系统如河流、水库都具有此功能. 对于天然河道中的水流, 其理论蕴藏的水能与水位差和通过的水量成正比.

(3) 水生生物. 水生生物是提供水体生态系统服务的主体的, 它们具有诸多的生态功能. 当前人类已知的服务主要包括: 1) 由藻类、水草等初级生产者提供的有机物质生产; 2) 初级生产者固定 CO_2 及释放氧气; 3) 营养元素的贮存及循环; 4) 维持生物多样性及进化过程; 5) 对污染物的吸收、分解及指示作用; 6) 提供水产品等. 在这类功能中, 除维持生物多样性及进化过程这一功能的计算目前还存在困难, 是需要解决的问题外, 其他功能均可进行定量估算.

(4) 环境效益. 此类生态服务主要表现在: 1) 调蓄分洪. 湖泊、水库的存在有效缓解了大江大河的洪水压力, 是湖泊和水库生态系统所特有的重要服务之一, 可用高水位和低水位对应的容积来推算其调蓄能力; 2) 气候调节. 水的特性衍生出其对极端气候的缓冲能力, 湖(库)区因此得益于水生态系统的气候调节功能, 目前对此项功能的评价研究很少, 也是近期需要解决的问题之一; 3) 水质净化. 在一定范围内, 水体能有效消除污染物的影响. 此功能是水体生态系统中各种物理、化学及生物学过程综合作用的结果. 当然, 任何水体都有污染物的负荷限值, 超过限值, 水质就会恶化; 4) 休闲娱乐、美学、教育、精神和文化价值; 5) 航运功能. 此项功能针对具有一定规模的河流而言.

水质作为水资源四要素中的一个重要内容, 其价值主要通过修正其他服务的价值而得以体现. 狭义的水质仅仅指水化学指标的含量, 但实际上, 水质是由水体物理、化学和生物学过程共同作用的结果, 应是一个综合参数, 在一定程度上用生态系统健康反映水质更具代表性.

随着恢复和维持一个健康的河流生态系统成为河流管理的重要目标, 河流的生物完整性及生态健康研究显得极其必要. 研究表明, 用河流水化学或物理指标作为河流生态状况评价工具存在难于综合且对生态系统的污染响应及解释不充分等缺陷, 而生物指标则能很好地克服这种缺陷, 应是河流水质及生态状况评价的主要指标^[18]. Karr^[19]提出了基于河流鱼类丰富度、指示种、杂交率等 12 项指标的生物完整性指数(IBM), 用于评价河流的环境状况. 该指数包含了一系列对环境状况变化较敏感的指标, 能够在比较的基础上对所研究的河流健康状况作出评价. 此外, 大型底栖无脊椎动物以其相对较长的生活周期、较高的生物多样性(在不同生境中都有分布)和形体易于辨别等优势而成为河流水质评价中另一常用的重要监测指标^[39]. 而藻类丰富度指数(AAI)^[27]及营养硅藻指数(TDI)^[20]等则是通过藻类的监测对河流水质进行评价的方法. 此外, 也有学者提出了基于河流水文学(自然条件下的流量变化和径流的季节动态等)、物理构造特征(河岸稳定性、河床的侵蚀或沉积、人工屏障的影响、粗木屑的来源和数量等)、河岸区状况(河岸植被类型、空间分布范围、宽度及其完整性、河岸植被的再生能力、湿地和干河道状况等)、水质(磷浓度、混浊度、电导率和 pH 值等)及水生生物(大型无脊椎动物的属类)等 5 方面共计 22 项指标体系计分基础上的溪流状况指数(Index of Stream Condition, ISC)^[21], 并据此对澳大利亚 80 多条河流健康状况进行了综合评价, 为河流健康状况综合评价提供了一种新思路^[45].

河流生态系统的服务价值和健康状况受多种因素制约.

其中,流域作为河流生态系统的外源影响因素,其气候、地质特征和土地利用状况等决定着其内河流的径流、河道、基质类型等物理及水化学特征.所以要维持一个健康的河流生态系统,首先就应该创建一个健康的流域环境.

5 河流生态系统管理与流域生态学

生态系统管理起源于传统的自然资源管理和利用领域,形成于1990年代,系指基于对生态系统组成、结构和功能过程的最佳理解,在一定的时空尺度范围内将人类价值和社会经济条件整合到生态系统经营中,以恢复或维持生态系统整体性和可持续性^[38].

对生态系统管理的定义,不同群体或个人根据不同的出发点有不同的看法,美国生态学会生态系统管理特别委员会于1995年提出的概念较为全面和系统^[54],即生态系统管理是具有明确和可持续目标驱动的管理活动,由政策、协议和实践活动保证实施,并在对维持生态系统组成、结构和功能的必要的生态相互作用和生态过程最佳认识的基础上从事研究和监测,以不断改进管理的适应性.具体而言,应包括如下几个方面:1)可持续性:生态系统管理将长期的可持续性作为管理活动的先决条件;2)目标:在生态系统可持续性的前提下,具体的目标应具有可监测性;3)生态系统模型:在生态学原理的指导下,不断建立适宜的生态系统功能模型,并将形态学、生理学及个体、种群、群落等不同层次上生态行为的认识上升到生态系统和景观水平,指导管理实践;4)复杂性和相关性:生态系统复杂性和相关性是生态系统功能实现的基础;5)动态特征:生态系统管理并不是试图维持生态系统某一种特定的状态和组成,动态发展是生态系统的本质特征;6)动态序列和尺度:生态系统过程在广泛的空间和时间尺度上进行着,并且任何特定的生态系统行为都受到周围生态系统的影响,因此,管理上不存在固定的空间尺度和时间框架;7)人类是生态系统的组成部分:人类不仅是引起生态系统可持续性问题原因,也是在寻求可持续管理目标过程中生态系统整体的组成部分;8)适应性和功能性:通过生态学研究 and 生态系统监测,人类不断深化对生态系统的认识,并据此及时调整管理策略,以保证生态系统功能的实现^[38, 53, 54].

作为河流生态系统的外源影响因素,研究表明,流域气候、地质和土地利用等状况决定着其内河流的径流、河道、基质类型等物理及水化学特征.流域土地利用的变化对河流生态系统具有深刻影响.如流域内的原始森林为农田所替代后,河流的光照水平显著增加,水温随之升高,从而导致藻类的增生;但木屑、落叶及其他粗有机颗粒物的输入量则明显减少,由此将对河流生态系统的物质和能量流造成重要影响^[23, 47].由此可知,人类活动是生态系统稳定性的重要影响因素,在何种尺度上以什么样的方式来度量这种影响至关重要.近年来已经有生态学家跳出了河流边界的限制,建议从流域的高度开展相关研究;甚至有学者提出了流域生态学^[5, 7-9]理论,认为应把水体视为流域的一个基本单元,重视其与流域陆地生态系统间的相互关系.

所谓流域生态学(watershed ecology)^[7, 8, 12],即以流域为研究单元,应用现代生态学的理论和系统科学的方法,研究流域内高地、沿岸带、水体各子系统间的物质、能量、信息流动规律,在研究流域作为一复合生态系统的结构和功能之基础上,进一步从中、大尺度上对流域内各种资源的开发利用、

保护及环境问题进行研究,为流域中陆地和水体的合理开发利用决策提供理论依据,从而为区域的社会经济可持续发展作出贡献.

很明显,流域生态学要求在流域尺度上开展河流研究,高度重视水体与陆地间的相互关系,为河流生态系统的研究、保护与管理提供了新思路.

以往流域管理的概念主要是以流域为单元,按照河流系统一定的功能和目标,以控制和管理出现超标洪水,最大限度地减少洪灾造成的损失为主,同时考虑人类经济活动和流域各个功能区环境目标.1990年代后提出了可持续管理的概念,其内涵和外延更为广泛,涉及流域内可持续发展的主要内容:如生态的、社会的、经济的和道德的等方面.一般观念认为,可持续管理是按照一定的生态环境功能和社会经济发展目标,综合运用行政、法律、教育、经济和科学技术措施,达到社会经济和环境可持续协调发展目的^[7].

流域层次上的生态系统模型是生态实践和生态系统管理的有力工具.目前研究的热点之一是应用基于河流流域的SWAT模型研究流域层面上的生态系统管理和可持续土地利用相关问题.如在德国,1997年以来,有19个来自不同学科如生物学、地理学、经济学、法学等的研究组汇集在一起对一些特定流域开展联合研究^[50].由于其中有大量的不同景观的功能与交换,该项目的核心是发展一种集成的方法,或一公共平台,以对区域土地利用的可持续操作进行经济和生态方面的分析和预测.3种模拟模型包括农业经济模型、生态与生物多样性模型(ELLA)以及水与营养平衡模型(SWAT)被研究或采用,并通过GIS进行互联.这些模型与试验研究小组密切结合,并将联合起来,作为一种工具,使政策决策者能对土地利用的变化进行评价^[29].

开展河流生态系统的生态学研究是流域生态学研究的重要基础.如包括鱼在内的水生生物不仅能净化水质,而且其生物多样性还随流域内陆地生态系统的土地利用状况而变化,是流域环境质量的指示生物.因此只有在充分了解河流生态系统生态因子间相互关系的基础上,才能进一步了解流域内水陆系统间的关系,从而在流域的高度上展开河流生态系统管理的综合研究.

6 结 语

综上所述,河流生态学经过近一个世纪的发展,其理论体系正日趋完善,该领域的研究成果也在不断的丰富着湖泊学理论体系.当前,河流生态学的研究在流域尺度上展开已经成为共识,结合河流健康及生态系统服务评价进行河流生态系统可持续管理研究将是近期河流生态学的重点问题之一.但就我国情况来看,由于种种原因,目前河流生态学的研究仍相对滞后于湖泊生态学的研究,我国的河流研究急需加快步伐,为我国可持续发展生态学管理研究贡献应有的力量.

参考文献

- 1 Acharya G. 1998. Capturing the hidden values of wetland ecosystems as a mechanism for fincing the wise use of wetlands. Paper for the Workshop on Mechanisms for Financing Wise Use of Wetlands.
- 2 Allan JD and Flecker AS. 1993. Biodiversity conservation in running waters. *Bioscience*, 43(1):32-43
- 3 Boon PJ, Calow P and Petts GE. 1992. River Conservation and Management. London: John Wiley & Sons.
- 4 Bretschko G. 1995. Running water ecosystems—A bare field for

- modelling? *Ecol Mode*, 78: 77~81
- 5 Cai QH, Chen YY, King L. 2001. Why watershed ecology—A new approach for research and protection of aquatic ecosystem. Proceedings on German-Chinese Symposium on Flood Risks and Land Use Conflicts in the Yangtze Catchment and at the Rhein River, Germany. Peter Lang: Europe Publishing House for Science. 21~42
 - 6 Cai Q-H(蔡庆华), Tang T(唐 涛), Deng H-B(邓红兵). 2003. Freshwater ecosystem service and its evaluation index system. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 14(1): 135~138(in Chinese)
 - 7 Cai Q-H(蔡庆华) and Liu J-K(刘建康). 1999. Watershed ecology and watershed ecosystem management. In: Xu H and Zhao Q, eds. Flood Hazard and Its Scientific Strategy in the Yangtze Valley. Beijing: Science Press. 130~134(in Chinese)
 - 8 Cai Q-H(蔡庆华), Wu G(吴 刚), Liu J-K(刘建康). 1997. Watershed ecology: New approach to study and protection of aquatic ecosystem. *Sci Technol Rev(科技导报)*, (5): 24~26 (in Chinese)
 - 9 Cai Q-H(蔡庆华), Wu G(吴 刚). 1998. Watershed ecology: New thinking of study sustainable development of resources, environment and social economy in Yangtze River Valley. In: Huang Z-L(黄真理), Fu B-J(傅伯杰), Yang Z-F(杨志峰), eds. Ecological and Environmental Conservation of Huge Key Water Control Project in 21st Century. Beijing: China Environment Science Press. 11~18 (in Chinese)
 - 10 Costanza R, d' Arge R, de Groot R, et al. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387: 253~260
 - 11 Cummins KW. 1992. The characters of watershed and river ecosystem. In: Boon PJ, eds. River Conservation and Management. London: John Wiley & Sons Ltd.
 - 12 Deng H-B(邓红兵), Wang Q-L(王庆礼), Cai Q-H(蔡庆华). 1998. Watershed ecology—New discipline, new idea and new approach. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 9(4): 443~449(in Chinese)
 - 13 Ehrlich PB. 1991. Population diversity and the future of ecosystem. *Science*, 254: 175~179
 - 14 Ehrlich PR. 1974. Human population and the global environment. *Science*, 62: 282~292
 - 15 Feng H-L(丰华丽), Wang C(王 超), Li J-C(李剑超). 2002. Advances in research of ecological and environmental water consumption of river basins. *Hohai Univ(河海大学学报)*, 30(3): 19~23(in Chinese)
 - 16 Grevilliot F, Krebs L, Muller S. 1998. Comparative importance and interference of hydrological conditions and soil nutrient gradients in floristic biodiversity in flood meadows. *Biodiv Conserv*, 7: 1495~1520
 - 17 Guo Z, Xiao X, Gan Y, et al. 2001. Ecosystem functions, services and their values—A case study in Xingshan County of China. *Ecol Econom*, 38: 141~154
 - 18 Harris JH, Silveira R. 1999. Large-scale assessments of river health using an index of biotic integrity with low-diversity fish communities. *Freshwater Biol*, 41: 235~252
 - 19 Karr JR. 1981. Assessments of biotic integrity using fish communities. *Fisheries*, 6: 21~27
 - 20 Kelly MG, Whitton BA. 1998. Biological monitoring of eutrophication in rivers. *Hydrobiologia*, 384: 55~67
 - 21 Ladson AR, White LJ, Doolan JA, et al. 1999. Development and testing of an index of stream condition for waterway management in Australia. *Freshwater Biol*, 41: 453~468
 - 22 Leff LG. 2000. Longitudinal change in microbial assemblages of the Ogeechee River. *Freshwater Biol*, 43: 605~615.
 - 23 Leland HV and Porter SD. 2000. Distribution of benthic algae in the upper Illinois River basin in relation to geology and land use. *Freshwater Biol*, 44: 279~301
 - 24 Li L-J(李丽娟), Zheng H-X(郑红星). 2000. Environmental and ecological water consumption of river systems in Haihe-Luanhe Basins. *Acta Geogr Sin(地理学报)*, 55(4): 495~500(in Chinese)
 - 25 Liu C-M(刘昌明). 2000. Issues concerned with water resources during the development of the west in China. *China Water Resour(中国水利)*, (8): 23~25(in Chinese)
 - 26 Loomis J, Kent P, Strange L, et al. 2000. Measuring the total economic value of restoring ecosystem services in an impaired river basin: results from a contingent valuation survey. *Ecol Econom*, 33: 103~117
 - 27 Marsden MW, Smith MR, Sargent RJ. 1997. Trophic state of rivers in the Forth catchment, Scotland. *Aquat Cons*, 7: 211~221
 - 28 Minshall GW, Cummins KW, Petersen RC, et al. 1985. Development in stream ecosystem theory. *Can J Fisher Aquat Sci*, 42: 1045~1055
 - 29 Möller D, Fohrer N, Weber A. 1999. Integrated modelling as a tool for decision support in land use planning. Proposal European Federation for Information Technology in Agriculture, Food and the Environment, EFITA 1999 in Bonn, Germany.
 - 30 Mosisch TD, Bunn SE, Davies PM, et al. 1999. Effect of shade and nutrient manipulation on periphyton growth in a subtropical stream. *Aquat Bot*, 64: 176~177
 - 31 Nienhuis PH. 1998. New Concepts for Sustainable Management of River Basins. Netherlands: Backuys Publishers.
 - 32 Nikora VI, Pearson CP, Shankar U. 1999. Scaling properties in landscape patterns: New Zealand experience. *Landscape Ecol*, 14: 17~33
 - 33 Ouyang Z-Y(欧阳志云), Wang X-K(王效科), Miao H(苗 鸿). 1999. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values. *Acta Ecol Sin(生态学报)*, 9(5): 607~613(in Chinese)
 - 34 Pan W-B(潘文斌), Tang T(唐 涛), Deng H-B(邓红兵), et al. 2002. Lake ecosystem services and their ecological valuation—A case study of Baoan Lake in Hubei Province. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 13(10): 1315~1318 (in Chinese)
 - 35 Petts GE. 1980. Long-term consequences of upstream impoundment. *Environ Conserv*, (7): 325~332
 - 36 Petts GE. 1996. Water allocation to protect river ecosystems. *Regulat Rivers: Res Manag*, 12: 353~365
 - 37 Qian Z-Y(钱正英), Zhang G-D(张光斗), et al. 2000. Comprehensive report on strategy of water resources of sustainable development in China. *Chin Water Resour(中国水利)*, (8): 5~17 (in Chinese)
 - 38 Ren H(任 海), Wu J-G(邬建国), Peng S-L(彭少麟), et al. 2000. Concept of ecosystem management and its essential elements. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 11(3): 455~458 (in Chinese)
 - 39 Resh VH and Jackson JK. 1993. Rapid assessment approaches to biomonitoring using benthic macroinvertebrates. In: Rosenberg DM and Resh VH, eds. Freshwater Biomonitoring and Benthic Macroinvertebrates. New York: Chapman & Hall. 195~223
 - 40 Richter BD, Baumgartner JV, Powell J, et al. 1996. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conserv Biol*, 10: 1163~1174
 - 41 Richter BD, Baumgartner JV, Wigington R, et al. 1997. How much water does a river need? *Freshwater Biol*, 37: 231~249
 - 42 Richter BD, Baumgartner JV, Braun DP, et al. 1998. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network. *Regulat Rivers: Res Manag*, 14: 329~340
 - 43 Sommer U. 2000. Benthic microalgal diversity enhanced by spatial heterogeneity of grazing. *Oecologia*, 122: 284~287
 - 44 Sun G(孙 刚), Sheng L-X(盛连喜), Zhou D-W(周道琦). 1999. Ecosystem services and corresponding protective strategies. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 10(3): 365~368 (in Chinese)
 - 45 Tang T(唐 涛), Cai Q-H(蔡庆华), Liu J-K(刘建康). 2002. River ecosystem health and its assessment. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 13(9): 1191~1194 (in Chinese)
 - 46 Vannote RL, Minshall GW, Cummins KW, et al. 1980. The river continuum concept. *Can J Fisher Aquat Sci*, 37: 130~137
 - 47 Wallace JB, Eggert SL, Merer JL, et al. 1997. Multiple trophic levels of a forest stream linked to terrestrial litter inputs. *Science*, 277(4): 102~104
 - 48 Ward JV and Stanford JA. 1983. The serial discontinuity concept of lotic ecosystems. In: Fontaine TD ed. Dynamics of Lotic Ecosystems. Butterworths: Ann Arbor Science Publishers. 29~42
 - 49 Ward JV. 1989. The four-dimensional nature of lotic ecosystems. *J North Amer Benthol Soc*, 8: 2~8
 - 50 Weber A, Fohrer N, Möller D. 2001. Long-term land use changes in a mesoscale watershed due to socio-economic factors—Effects on landscape functions. *Ecol Model*, 140(1~2): 125~140
 - 51 Welcomme RL. 1985. River fisheries. FAO Fisheries Technical Paper.
 - 52 Whitton BA. 1975. River Ecology. London: Blackwell Scientific Publications.
 - 53 Yu G-R(于贵瑞). 2001. A conceptual framework and the ecological basis for ecosystem management. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 12(5): 787~794(in Chinese)
 - 54 Zhao S-D(赵士洞), Wang Y-X(汪业勳). 1997. Summary on ecosystem management. *Chin J Ecol(生态学杂志)*, 16(4): 35~38 (in Chinese)

作者简介 蔡庆华,男,1964年生,博士,研究员,主要从事淡水生态学、系统生态学及流域生态学研究,发表论文90余篇。Tel: 027-87647865, E-mail: qhcai@ihb.ac.cn